

ЭВОЛЮЦИЯ СХЕМ ТЕПЛООБМЕНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спирин, С.А. Загайнов

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Рассмотрено развитие схем теплообмена в доменной печи по мере совершенствования технологии доменной плавки. Показано, что наличие двух зон интенсивного теплообмена и в современных условиях при плавке различного вида железорудного сырья, использовании комбинированного дутья высоких параметров является обязательным условием устойчивости хода доменного процесса и экономичности плавки.

Ключевые слова: черная металлургия, доменный процесс, теплообмен, массообмен, закономерности, принципы, схема

We consider the development of schemes of heat exchange in a blast furnace as the technology of blast furnace smelting. It is shown that the presence of two zones of intense heat in the present conditions in the smelting of various types of iron ore, the use of combined blast parameters of high stability is a prerequisite for the progress and efficiency of blast furnace smelting.

Keywords: iron and steel, blast furnace, heat transfer, mass transfer, laws, principles, scheme.

Математическая модель, описывающая теплофизические и физико-химические явления доменной плавки, была предложена проф. Б.И. Китаевым в 1944 г. [1]. Полное описание модели дано в монографиях [2–6]. Используя результаты анализа изменения теплоемкостей потоков шихты и газа по высоте печи, Б.И. Китаев сформулировал основные положения теории теплообмена в доменной печи, которые сводятся к следующему [1, 2]:

1. Интенсивность теплоотдачи от газа-теплоносителя к материалу осуществляется в двух ступенях теплообмена: верхней и нижней. Ступени теплообмена разделены зоной замедленного теплообмена, где температурный градиент по высоте достигает минимального значения.

2. Тепловая работа каждой из ступеней теплообмена отличается самостоятельностью (автономностью) и характеризуется существенным различием в отношениях теплоемкостей потоков шихты и газа. Зона замедленного теплообмена, разделяющаяся зоной активного теплообмена, характеризуется отношением теплоемкостей потоков, близким к 1. Верхняя ступень теплообмена имеет $W_{\text{ш}} < W_{\text{г}}$, т.е. $m < 1,0$, а нижняя $W_{\text{ш}} > W_{\text{г}}$, т.е. $m > 1,0$.

3. Теплообмен в доменной печи завершен, что подтверждается существованием зоны замедленного теплообмена. В этой зоне теплоемкости потоков газа и шихты сближаются так, что $W_{\text{ш}} \approx W_{\text{г}}$, $m \approx 1$.

Характер изменения температур газа и шихты, отношения их теплоемкостей потоков по высоте печи представлены на рис. 1, а. Таким образом, по

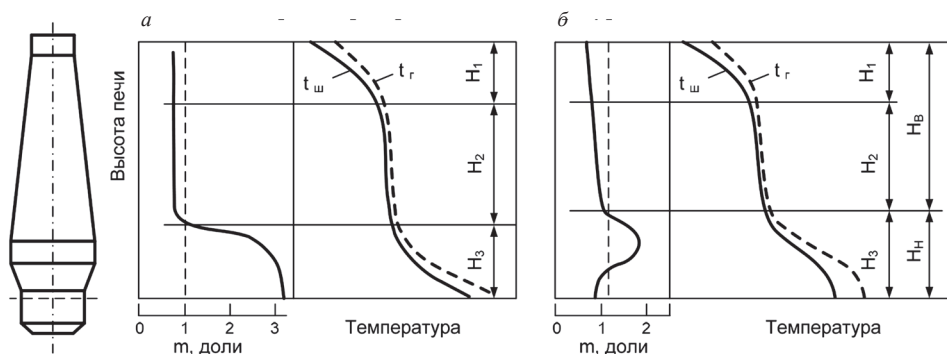


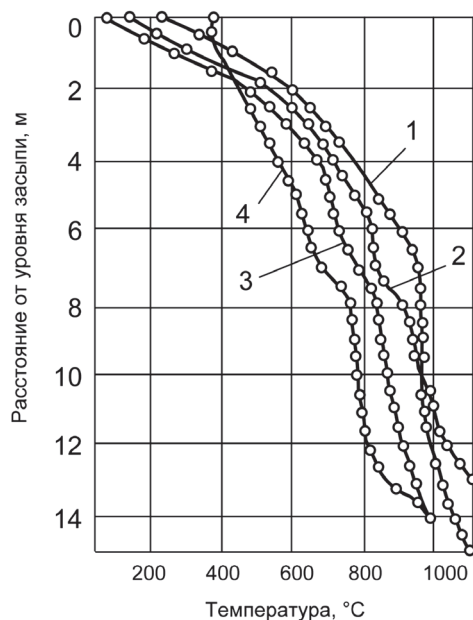
Рис. 1. Схемы теплообмена в доменной печи:
 а – схема теплообмена 1944 г.; б – схема 1961 г. $t_{\text{ш}}$, $t_{\text{г}}$ – температура шихты и газа; m – отношение теплоемкостей потоков шихты и газа; H_1 – верхняя ступень теплообмена; H_2 – зона замедленного теплообмена; H_3 – нижняя ступень теплообмена; $H_{\text{н}}$ – верхняя тепловая зона; $H_{\text{н}}$ – нижняя тепловая зона

высоте доменной печи при ровном ходе наблюдается типичное S-образное распределение температур.

Эксперименты на действующих печах в последующие годы показали, что высота нижней ступени теплообмена в действительности несколько больше, чем получается в результате расчета по схеме рис. 1, а. Накопленные данные об особенностях теплообмена в нижней ступени создали условия для дальнейшего развития схемы теплообмена. Б.И. Китаевым, Б.Л. Лазаревым, Ю.Г. Ярошенко [4–7] были внесены дополнения в схему теплообмена, в соответствии с которыми верхняя ступень теплообмена и зона замедленного теплообмена оставались без изменений, но был принят другой характер изменения отношения теплоемкостей по высоте нижней ступени теплообмена. С приближением к горизонту воздушных фурм отношение, как и в старой схеме, сначала росло, но мере снижения интенсивности реакции прямого восстановления это отношение уменьшалось и становилось меньше единицы. При этом у температурных кривых шихты и газа в нижней ступени теплообмена появился характерный изгиб в сторону снижения градиента температур. Общий вид уточненной схемы теплообмена по высоте доменной печи приведен на рис. 1, б, которая отличается от схемы рис. 1, а, тем, что нижняя ступень теплообмена разделена на две части: для верхней $W_{\text{ш}} > W_{\text{г}}$, а для нижней $W_{\text{ш}} < W_{\text{г}}$, что обусловлено окончанием процессов прямого восстановления оксидов железа к нижнему горизонту и, следовательно, общее теплопоглощение шихты существенно уменьшается.

Исследования работы доменных печей в последующие десятилетия показывают, что температурное поле по высоте доменных печей претерпевает заметную деформацию. Сущность этой тенденции заключается в наличии у температурных кривых по высоте печи нескольких локальных участков замедленного теплообмена. Впервые это было замечено Н.Н. Бабарыкиным и Ф.А. Юшиным при рассмотрении температурного поля, полученного методом вертикального зондирования доменных печей ММК. Серия измерений при плавке различного железорудного сырья показала наличие по высоте

Рис. 2. Изменение температуры газа по высоте доменной печи при плавке окатышей, офлюсованных известняком – 1, доломитом – 2; нефлюсованных – 3 и агломерата – 4



шахты доменной печи в некоторых случаях двух участков малоизменяющейся температурой (см. рис. 2) [8].

Обобщая экспериментальные данные по тепловой и восстановительной работе доменных печей проф. Н.Н. Бабарыкин [9] предложил схему теплообмена, приведенную на рис. 3. Согласно этой схеме наблюдаемые в экспериментах два участка замедленного теплообмена по высоте шахты образуются в результате действия химических реакций с отрицательными тепловыми эффектами. Формирование верхнего участка обусловлено действием эндотермических реакций восстановления магнетита оксидом углерода, а образование нижнего участка связывается с действием теплопоглощения при заметном развитии реакции газификации углерода кокса диоксидом углерода.

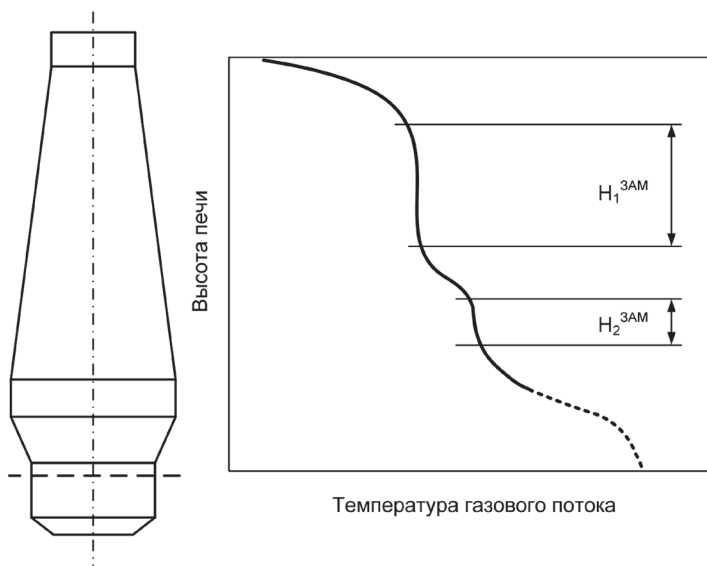


Рис. 3. Схема распределения температур по высоте печи, по данным Н.Н. Бабарыкина:
 $H_1^{\text{зам}}$, $H_2^{\text{зам}}$ – верхний и нижний участки замедленного теплообмена

Действительно, взаимное влияние восстановления и теплообмена в доменных печах в зоне косвенного восстановления связано с последовательностью превращения при $t > 572\text{ }^{\circ}\text{C}$:



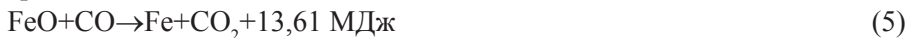
При этом первая стадия с реакциями



вторая –



третья –



Из анализа уравнений следует, что первая стадия восстановления оксидов железа газообразными восстановителями идет с выделением тепла, вторая – с его поглощением. Третья стадия в зависимости от соотношения скоростей восстановления оксидом углерода и водородом может протекать как с выделением, так и с поглощением тепла.

Опубликованные данные по математическому моделированию процессов тепло- и массообмена в доменных печах показывают, что при формировании температурных полей в шахте печи не всегда проявляются два участка замедленного теплообмена [10–13]. И это вполне объяснимо, так как результаты моделирования во многом зависят от принятых значений коэффициентов настройки моделей и, в частности, от кинетических характеристик железорудного сырья и коэффициентов теплопередачи.

В связи с этим представляют интерес результаты имитационного моделирования совместного развития теплообменных и восстановительных процессов по высоте шахты доменной печи, выполненные Б.И. Китаевым, Е.Л. Сухановым, Н.А. Драничниковым и С.А. Загайновым. При этом сделано допущение о чисто ступенчатом характере восстановления оксидов железа. На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования применительно к условиям работы доменной печи № 3 объемом 3000 м³ Западно-Сибирского металлургического комбината [14–15].

Общая картина теплообменных и восстановительных процессов, показанная на рис. 4, представляет наиболее сложный случай проявления взаимосвязи теплообмена и восстановления в верхней части шахты доменной печи, когда поток шихты перегревается по сравнению со встречным потоком газа. Эта область характеризуется сравнительно небольшим перепадом между температурами газа и шихты. Поэтому данная область, а также прилегающие к ней горизонты, отличаются относительно низкими тепловыми потоками от греющего теплоносителя к нагреваемому ма-

Рис. 4. Изменение основных параметров восстановления по высоте шахты доменной печи при наличии локального перегрева шихты относительно газа: φ – степень восстановления материалов; q_r – расход газифицированного углерода кокса

териалу и обратно и образуют в верхней части доменной печи участок замедленного теплообмена. Уровень температур этого участка колеблется в пределах 700–760 °С.

На рис. 5 представлены результаты математического моделирования других условий, когда перегрева шихты относительно газа не было. При отсутствии перегрева шихты по сравнению с газом в верхних слоях шахты доменной печи вертикальные и слабонаклонные участки температурных кривых также образуют область замедленного теплообмена. Восстановительные процессы в этой области представлены недостаточно развитыми реакциями второй стадии восстановления. Ниже верхнего участка замедленного теплообмена тепловой поток от газа к шихте увеличивается, температура шихты сравнительно быстро растет.

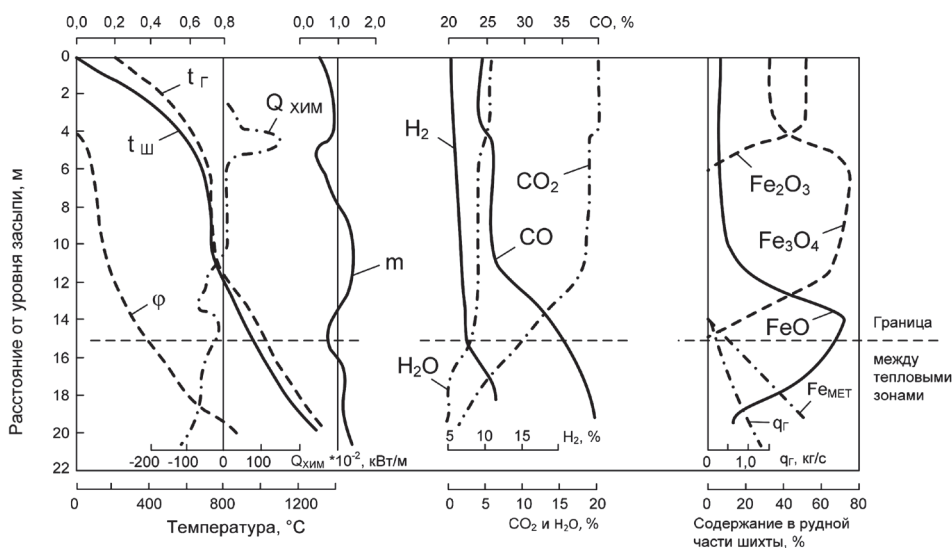
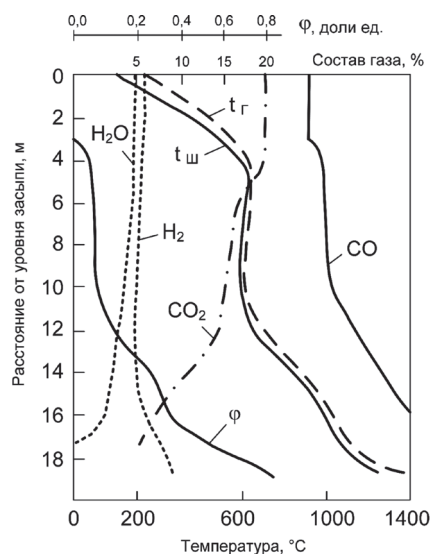


Рис. 5. Результаты моделирования совместного развития теплообменных и восстановительных процессов при отсутствии локального перегрева шихты относительно газа

Высота второго (нижнего) участка замедленного теплообмена зависит от соотношения тепловых эффектов экзо- и эндотермических реакций последней стадии восстановления оксидов железа. Однако значительно большую роль в теплотреблении на этом участке высоты шахты начинает играть реакция газификации углерода кокса, которая отличается большими значениями теплового эффекта на единицу прореагировавшего вещества.

Полученные при моделировании особенности развития теплообмена в шахте доменной печи показывают, что разность между температурами шихты и газа по ходу теплоносителя может неоднократно уменьшаться и увеличиваться, отражая сложный процесс взаимного влияния теплообмена и восстановления.

Обобщая экспериментальные и теоретические исследования развития процессов в шахте печи и полученные ранее данные о работе нижней части доменной печи, Б.И. Китаев с учениками предложили уточненную схему теплообмена по высоте печи [16–17], представленную на рис. 6, позволяющую проиллюстрировать особенности развития теплообмена в доменной печи при современной технологии производства чугуна.

Конкретные режимы доменной плавки могут отличаться горизонтами выделенных схем отдельных участков теплообмена и восстановления, а также конкретными температурами на этих участках.

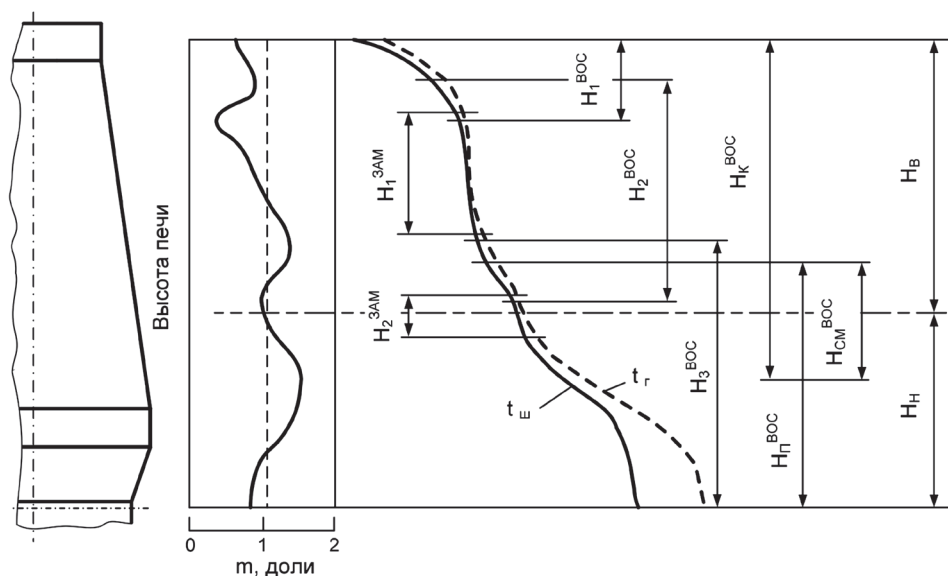


Рис. 6. Схема теплообмена по высоте доменной печи при современной технологии доменной плавки:

$H_1^{\text{зам}}$, $H_2^{\text{зам}}$ – верхний и нижний участки замедленного теплообмена; $H_1^{\text{вос}}$, $H_2^{\text{вос}}$, $H_3^{\text{вос}}$ – зоны восстановления гематита, магнетита и вюстита; $H_K^{\text{вос}}$, $H_П^{\text{вос}}$, $H_{\text{см}}^{\text{вос}}$ – зоны косвенного прямого и смешанного восстановления; H_B , H_H – верхняя и нижняя тепловые зоны

При наличии по высоте шахты двух участков замедленного теплообмена возникает вопрос, касающийся сложившейся ранее концепции разделения доменной печи по высоте на тепловые зоны. В связи с этим отметим следующее.

Верхний участок замедленного теплообмена по результатам математического моделирования характеризуется как невысокой интенсивностью теплообмена, так и низкими скоростями восстановительных реакций. Таким образом, верхний участок замедленного теплообмена с точки зрения теплообмена является резервной высотой, обеспечивающей улучшение тепловой и восстановительной работы печи.

Нижний участок замедленного теплообмена отличается тем, что при малых тепловых потоках от газа к шихте в общем случае скорости химических реакций достаточно высоки. Усиление восстановительной работы в данной области шахты вызовет ускорение реакций газификации углерода кокса диоксидом углерода и водяным паром, что в свою очередь приведет к увеличению расхода кокса. Исходя из этого, можно утверждать, что нижний участок замедленного теплообмена в качестве резерва для улучшения тепловой и восстановительной работы доменной печи использоваться быть не должен.

В связи с этим для исследования и оценки теплового состояния как объекта управления доменную печь целесообразно делить по-прежнему на две тепловые зоны, верхнюю и нижнюю, граница раздела между которыми располагается в верхней части области смешанного восстановления, между уровнем начала газификации углерода кокса и горизонтом, ниже которого оксиды железа восстанавливаются прямым путем.

Обобщение и анализом экспериментальных и теоретических исследований в дальнейшем показано, что описанная схема теплообмена и в современных условиях плавки при плавке различного вида железорудного сырья, использовании комбинированного дутья высоких параметров, больших и малых доменных печей является обязательным условием устойчивости хода доменного процесса и экономичности плавки. Любые изменения технологии современной доменной плавки не должны менять этой схемы [16–18].

Список использованных источников

1. Kitaev B.I. *The schema of heat exchange in a the blast furnace and the preporation of ores for melting* // *Stal* 7-8, 1944.
2. Китаев Б.И. *Теплообмен в шахтных печах*. Свердловск; М.: Металлургиздат, 1945. – 152 с.
3. Kitaev B.I., YU.G.Yaroshenko & V.D. Suchkov. *Heat exchange in shaft furnaces. Translated from the Russian by M.M. PAGE and B.SIMONS and edited by YOYNG. PERGAMON PRESS. London, 1967. 299 p.*
4. Китаев Б.И. *Теплообмен в доменной печи* / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Д. Лазарев. М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
5. Китаев Б.И. *Теплотехника доменного процесса* / Б.И.Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н.Овчинников, В.С.Швыдкий // М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
6. Китаев Б.И. *Управление доменным процессом* / Б.И. Китаев. Свердловск: УПИ, 1984. – 94 с.
7. Лазарев Б.Л., Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г. *Анализ процессов теплообмена в доменных печах* // *Сталь*, 1961. № 3. С. 200–206.

8. Бабарыкин Н.Н., Марсуверский Б.А., Новиков В.С. Свойства окатышей ССГОК и их поведение в доменной печи // Производство чугуна. Вып. 4. Свердловск: УПИ, 1978. С. 66–79.
9. Бабарыкин Н.Н. Влияние восстановительных процессов на теплообмен в доменной печи // Сталь, 1981. № 3. С. 5–9.
10. Овчинников Ю.Н. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спирин, Б.А. Боковых. Челябинск: Металлургия, 1989. – 120 с.
11. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса // Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 162 с.
12. Доброскок В.А. Метод разработки новых технологических режимов доменной плавки на основе комплекса математических моделей / В.А. Доброскок, А.И. Туманов, А.В. Ганчев // Изв. вузов. Черная металлургия, 1987. № 5. С. 146–147.
13. Мойкин В.И. Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования / В.И. Мойкин, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковых и др. // Сталь, 1984. № 4. С. 9–14.
14. О взаимном влиянии теплообменных и восстановительных процессов в шахте доменной печи. Сообщение 1 / Н.А. Драничников, Б.И. Китаев, Е.Л. Суханов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 1982. № 2. С. 6–9.
15. О взаимном влиянии теплообменных и восстановительных процессов в шахте доменной печи. Сообщение 2 / Н.А. Драничников, Б.И. Китаев, Е.Л. Суханов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 1982. № 4. С. 8–11.
16. Спирин Н.А. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 243 с.
17. О схемах теплообмена в доменной печи // Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, Ю.В. Федурлов и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 9. С. 16–18.
18. Спирин Н.А. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 462 с.